

*М. Й. БУРБЕЛО, О. В. СТЕПУРА*

## **ЗАСТОСУВАННЯ УЗАГАЛЬНЕНИХ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ СПОЖИВАЧІВ, ЯКІ СПОТВОРЮЮТЬ ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

У статті проаналізовані методи виявлення впливу нелінійних несиметричних споживачів на електричні мережі. Недоліком відомих методів виявлення джерел спотворень є те, що вони не дозволяють розрізнити гармонічні складники, які зумовлюють струми зворотної та нульової послідовностей, а також виявити несиметрію навантажень за зворотною та нульовою послідовностями. Обґрунтовано доцільність застосування системи узагальнених миттєвих симетричних складових та визначених на їх основі умовних потужностей зворотної та нульової послідовностей для виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії. Показано, що в симетричному режимі узагальнений миттєвий струм зворотної послідовності містить п'яту гармоніку, а в несиметричному – додатково першу гармоніку, що зумовлена несиметрією навантажень. В симетричному режимі струм нульової послідовності містить третю гармоніку, а в несиметричному – першу і третю. Для оцінювання внеску споживачів в погіршення якості електроенергії доцільно використати умовні потужності зворотної та нульової послідовностей. Проаналізована можливість виявлення та оцінювання впливу джерел спотворень (несиметрії та вищих гармонік) на якість електроенергії трифазних мереж з використанням миттєвих умовних потужностей зворотної послідовності  $p_{i2}, q_{i2}$ , які є добутком миттєвих напруги прямої послідовності на струм зворотної послідовності, а також миттєвих умовних потужностей нульової послідовності  $p_{i0}, q_{i0}$ , які є добутком миттєвих напруги прямої послідовності на струм нульової послідовності. Показано, що за наявності гармонічних спотворень середньоквадратичні значення умовних потужностей зростають. У разі несиметрії навантажень збільшуються середні значення цих величин. **Ключові слова:** електричні мережі, несиметричні несинусоїдні режими, миттєві струми зворотної та нульової послідовностей, умовні миттєві потужності зворотної та нульової послідовностей, середньоквадратичні та середні значення.

*М. И. БУРБЕЛО, А. В. СТЕПУРА*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ОБОБЩЕННЫХ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ, ИСКАЖАЮЩИХ КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

В статье проанализированы методы выявления влияния нелинейных несимметричных потребителей на электрические сети. Недостатком известных методов выявления источников искажений является то, что они не позволяют различить гармоничные составляющие, которые обуславливают токи обратной и нулевой последовательностей, а также выявить несимметрию нагрузок по обратной и нулевой последовательностям. Обоснована целесообразность применения системы обобщенных мгновенных симметричных составляющих и определенных на их основе условных мощностей обратной и нулевой последовательностей для выявления потребителей, искажающие качество электроэнергии. Показано, что в симметричном режиме обобщенный мгновенный ток обратной последовательности содержит пятую гармонику, а в несимметричной - дополнительно первую гармонику, обусловленную несимметрией нагрузок. В симметричном режиме ток нулевой последовательности содержит третью гармонику, а в несимметричной - первую и третью. Для оценки вклада потребителей в ухудшение качества электроэнергии целесообразно использовать условные мощности обратной и нулевой последовательностей. Проанализирована возможность выявления и оценки влияния источников искажений (несимметрии и высших гармоник) на качество электроэнергии трехфазных сетей с использованием мгновенных условных мощностей обратной последовательности,  $p_{i2}, q_{i2}$ , которые являются произведением мгновенных напряжения прямой последовательности на ток обратной последовательности, а также мгновенных условных мощностей нулевой последовательности  $p_{i0}, q_{i0}$ , которые являются произведением мгновенных напряжения прямой последовательности на ток нулевой последовательности. Показано, что при наличии гармонических искажений среднеквадратичные значения условных мощностей растут. В случае несимметрии нагрузок увеличиваются средние значения этих величин.

**Ключевые слова:** электрические сети, несимметричные несинусоидальные режимы, мгновенные токи обратной и нулевой последовательностей, условные мгновенные мощности обратной и нулевой последовательностей, среднеквадратичные и средние значения.

*M. Y. BURBELO, O. V. STEPURA*

## **APPLICATION OF GENERALIZED SYMMETRIC COMPONENTS FOR THE IDENTIFICATION OF CONSUMERS WHICH MAKE THE QUALITY OF ELECTRICITY**

The article analyzes the methods of detecting the influence of nonlinear asymmetric consumers on electrical networks. A disadvantage of known methods for detecting sources of distortion is that they do not distinguish between the harmonic components that cause the currents of reverse and zero sequences, as well as detect the asymmetry of loads on the reverse and zero sequences. The expediency of using the system of generalized instant symmetric components and the based on the conditional capacities of reverse and zero sequences for the detection of consumers that distort electricity quality is substantiated. It is shown that in the symmetric mode the generalized instantaneous reverse current contains the fifth harmonic, and in the asymmetric mode, the first harmonic due to the load asymmetry. In the symmetric mode, the zero sequence current contains the third harmonic, and in the asymmetric mode, the first and third harmonics. To estimate the contribution of consumers to the deterioration of the quality of electricity, it is advisable to use conditional reverse and zero sequencing capacities. The possibility of detecting and evaluating the influence of distortion sources (asymmetry and higher harmonics) on the electric power quality of three-phase networks using instantaneous inverse sequence capacities  $p_{i2}, q_{i2}$ , which are the product of instantaneous sequences of direct sequences in reverse sequences, is also  $p_{i0}, q_{i0}$ , which are the product of instantaneous direct-sequence voltage to zero-sequence current. It is shown that, in the presence of harmonic distortions, the rms values of the conditional capacities increase. In the case of load asymmetries, the average values of these values increase.

**Keywords:** electrical networks, asymmetric non-sinusoidal modes, instantaneous currents of reverse and zero sequences, conditional instantaneous capacities of reverse and zero sequences, root mean square and average values.

**Вступ.** Для експериментального визначення відповідальності споживачів за погіршення якості електроенергії (ЯЕ) без їх вимкнення одним з перших був запропонований метод балансу активних та реактивних потужностей для  $s$ -ї симетричної складової (СС) зворотної та нульової послідовностей та  $n$ -ї гармонічної складової (ГС) на межі балансової належності, згідно з яким вважають, що окрім основного потоку енергії з мережі до навантаження, що визначається симетричною складовою прямої послідовності основної гармоніки, для несиметричних та нелінійних навантажень існує вторинний потік енергії, який направлений в електричну мережу, що зумовлений симетричними складовими зворотної та нульової послідовностей промислової частоти та вищими гармоніками [1, 2].

Якщо складники активної та реактивної потужностей  $s$ -ї послідовності  $n$ -ї гармоніки від'ємні, то вони направлені від споживача в мережу (від джерела спотворення) і споживачі повинні нести відповідальність за зниження показників ЯЕ.

В [3, 4] доведено, що активну потужність  $n$ -ї ГС не можна використовувати для виявлення джерела спотворення. Це пояснюється тим, що напруга ГС визначається струмами спотворення як системи, так і навантаження в рівній мірі і значення активної потужності не характеризують однозначно внесок споживача в зниження ЯЕ.

Недоліком використання реактивної потужності  $n$ -ї гармоніки є неможливість виявлення споживача, що спотворює якість електроенергії у разі, якщо струм спотворення контрольованого споживача менший від сумарного струму спотворення решти споживачів.

Ще одним недоліком використання реактивної потужності  $n$ -ї гармоніки є їх відносна малість (десяті, соті частки відсотка від потужності основної гармоніки прямої послідовності). У разі якщо опір мережі малий (жорстка мережа), то спади напруг незначні. Розрахунок реактивної потужності ускладнений через неможливість точно виміряти амплітуди і початкові фази напруг вищих гармонік.

Авторами [5] пропонується для виявлення нелінійних споживачів використати порівняння реактивної потужності на основній гармоніці  $Q_1 = U_{(1)} I_{(1)} \sin \varphi_{(1)}$ , реактивної потужності за С. Фрізе  $Q_F = \sqrt{S^2 - P^2}$  та реактивної потужності за Д. Шароном  $Q_S = U \sqrt{\sum_n I_{(n)}^2 \sin^2 \varphi_{(n)}}$ , де  $S, P, U$  – повна і активна потужності та середньоквадратична напруга. Метод базується на тому, що для випадку синусоїдних струму та напруги всі три значення  $Q_1$ ,  $Q_F$  та  $Q_S$  будуть рівні, а для нелінійного навантаження – різними. Причому,  $Q_1$  буде мінімальною, а  $Q_F$  буде мати максимальне значення. Реактивна потужність  $Q_S$  буде знаходитися між  $Q_1$  та  $Q_F$ . Причому, у випадку несинусоїдної напруги та лінійного навантаження,  $Q_S$  має значення, яке близьке до  $Q_1$ . В протилежному випадку, коли напруга синусоїдна і навантаження нелінійне,  $Q_S$  має значення, близьке до  $Q_F$ , через більші спотворення

струму, споживаного нелінійним навантаженням. У випадку несинусоїдної напруги та нелінійного навантаження значення  $Q_S$  буде мати середнє значення між  $Q_1$  та  $Q_F$ .

В [6, 7] запропоновано метод, що заснований на потужностях спотворення  $D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$ ,  $D_1 = \sqrt{S^2 - P_1^2 - Q_1^2}$  та  $D_e = \sqrt{S^2 - P_e^2 - Q_e^2}$ , де  $P_e, Q_e$  – ефективні активна та реактивна потужності:  $P_e = \sqrt{P_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} P_n^2}$ ;  $Q_e = \sqrt{Q_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} Q_n^2}$ .

В [8] запропоновано використовувати напрямки і значення потужностей спотворення, які визначають як добуток напруги прямої послідовності основної гармоніки на комплексний струм  $n$ -ї ГС. Обґрунтування такого підходу ґрунтується на тому, що струм  $n$ -ї ГС на межі балансової належності практично визначається струмом спотворення споживача.

Недоліком усіх методів є те, що вони не дозволяють розрізнити гармонічні складники, які зумовлюють струми зворотної та нульової послідовностей, а також виявити несиметрію навантажень за зворотною та нульовою послідовностями.

Мета роботи полягає у використанні миттєвих симетричних складових напруг і струмів та миттєвих потужностей зворотної та нульової послідовностей для виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії, та у використанні нових методів визначення участі суб'єктів у відповідальності за порушення вимог до ЯЕ в автоматизованих системах контролю й обліку електроспоживання [9, 10].

**Обґрунтування результатів.** В теорії електричних машин використовуються лінійні перетворення миттєвих напруг і струмів [11]:

$$f_p(t) = \frac{1}{3}(\tilde{f}_A(t) + \tilde{f}_B(t + T/3) + \tilde{f}_C(t + 2T/3)); \quad (1)$$

$$f_n(t) = \frac{1}{3}(\tilde{f}_A(t) + \tilde{f}_B(t - \frac{T}{3}) + \tilde{f}_C(t - 2T/3)); \quad (2)$$

$$f_0(t) = \frac{1}{3}(f_A(t) + f_B(t) + f_C(t)), \quad (3)$$

де  $f_p(t)$ ,  $f_n(t)$ ,  $f_0(t)$  – миттєві напруга або струм прямої, зворотної та нульової послідовностей;  $\tilde{f}_k(t) = f_k(t) - f_0(t)$ ,  $k = \{A, B, C\}$  – миттєві фазні напруги або струми за виключенням напруги або струму нульової послідовності;  $T$  – період напруги живлення основної частоти.

Перетворення (1),..., (3) в [12] названі узагальненими симетричними складовими, де також розглянуто їх особливості. Зокрема, в [12] показано, що в періодичних несинусоїдних режимах

$$\begin{bmatrix} f_A(t) \\ f_B(t) \\ f_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{f}_p(t) + \tilde{f}_n(t) + f_0(t) + f_{rA}(t) \\ f_p(t - T/3) + \tilde{f}_n(t + T/3) + f_0(t) + f_{rB}(t) \\ f_p(t - 2T/3) + \tilde{f}_n(t + 2T/3) + f_0(t) + f_{rC}(t) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де  $f_{rk}(t)$ ,  $k = \{A, B, C\}$  – залишкові складові напруг і струмів, для визначення яких використовують формулу [2]:

$$\begin{bmatrix} f_{rA}(t) \\ f_{rB}(t) \\ f_{rC}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \tilde{f}_A(t) + \tilde{f}_A(t + T/3) + \tilde{f}_A(t + 2T/3) \\ \tilde{f}_B(t) + \tilde{f}_B(t + T/3) + \tilde{f}_B(t + 2T/3) \\ \tilde{f}_C(t) + \tilde{f}_C(t + T/3) + \tilde{f}_C(t + 2T/3) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

В [13-15] використано такі лінійні перетворення миттєвих напруг і струмів:

$$f_1(t) = \frac{1}{\sqrt{6}}(f_\alpha(t) - f'_\beta(t)), \quad (6)$$

$$f_2(t) = \frac{1}{\sqrt{6}}(f_\alpha(t) + f'_\beta(t)), \quad (7)$$

де  $f_1(t)$ ,  $f_2(t)$  – миттєві напруга або струм прямої та зворотної послідовностей;  $f_\alpha(t) = \frac{1}{\sqrt{6}}(2f_A(t) - f_B(t) - f_C(t))$ ,  $f'_\beta(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}(f'_B(t) - f'_C(t))$  – миттєві напруга або струм в системі  $\alpha\beta$ -координат; штрихом тут і нижче позначено фазовий зсув усіх гармонік миттєвих величин на  $-90$  ел. градусів.

Оскільки перетворення (6), (7) є достатньо складними в реалізації, то їх можна замінити наближеними виразами:

$$f_1(t) \approx \frac{1}{\sqrt{6}}(f_\alpha(t) - f_\beta(t - T/4)); \quad (8)$$

$$f_2(t) \approx \frac{1}{\sqrt{6}}(f_\alpha(t) + f_\beta(t - T/4)), \quad (9)$$

$$\text{де } f_\beta(t - T/4) = \frac{1}{\sqrt{2}}(f_B(t - T/4) - f_C(t - T/4)).$$

Розглянемо несинусоїдний режим, за якого струм навантаження містить третю, п'яту та сьому гармоніки, амплітуди яких становлять відповідно 1 %, 5 % та 4 % від амплітуди основної гармоніки струмів фаз:  $i_k = \sqrt{2}I_k(\sin \omega t + 0,01 \sin 3\omega t \pm 0,05 \sin 5\omega t \mp 0,04 \sin 7\omega t)$ , ( $k = A, B, C$ ), що характерно для розподільних мереж за наявності випрямлячів. Потужність навантаження на основній гармоніці становить:  $P_1 = 111,4 \text{ кВт}$ ,  $Q_1 = 63,3 \text{ кВ} \cdot \text{Ар}$ . В несиметричному режимі струм фази  $C$  на 10% менший від струму інших фаз.

На рис. 1 зображено залежності струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей, а також залишкової складової за симетричного навантаження, а на рис. 2 – за несиметричного навантаження.

В обох режимах струми  $i_1(t)$  та  $i_p(t)$  відрізняються незначно. Струм  $i_1(t)$  містить першу та сьому гармоніки, а  $i_p(t)$  – першу, п'яту та сьому гармоніки.

В симетричному режимі узагальнений миттєвий струм зворотної послідовності  $i_2(t)$  містить п'яту гармоніку, а струм  $i_n(t)$  – відсутній. За несиметричного режиму узагальнені миттєві струми  $i_2(t)$ ,  $i_n(t)$  містять додатково струми першої гармоніки, що зумовлені несиметрією навантажень.

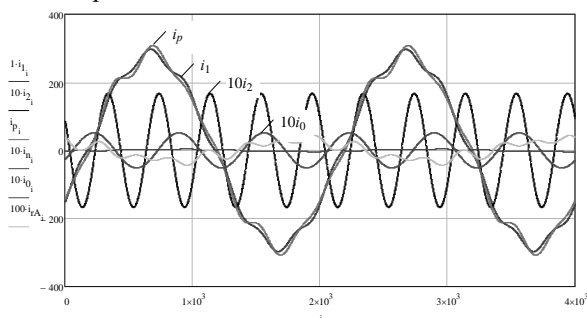


Рис. 1 – Залежності струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей за симетричних струмів фаз

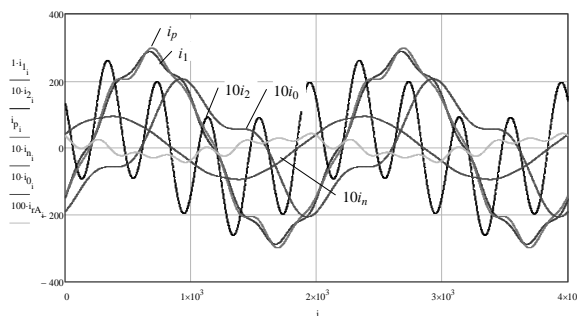


Рис. 2 – Залежності струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей за несиметричних струмів фаз

В симетричному режимі струм нульової послідовності  $i_0(t)$  містить третю гармоніку, а в несиметричному – першу і третю.

З теоретичної електротехніки відомо, що струми першої, четвертої, сьомої, ... гармонік утворюють пряму послідовність, струми другої, п'ятої, восьмої, ... гармонік – зворотну послідовність, третьої, шостої, дев'ятої, ... гармонік – нульову послідовність. З цієї точки зору перетворення (6), (7) краще відповідають терміну «узагальнені симетричні складові» ніж перетворення (1), (2).

Для оцінювання внеску споживачів в погіршення якості електроенергії доцільно використати умовні потужності зворотної та нульової послідовностей [5]. Розглянемо залежності миттєвих потужностей зворотної послідовності  $p_{i_2} = 3u_1 i_2$ ,  $q_{i_2} = 3u'_1 i_2$  за симетричного навантаження (рис. 3). Середньоквадратичні значення цих потужностей:  $P_{cki_2} = 7,6 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ,  $Q_{cki_2} = 7,6 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ .

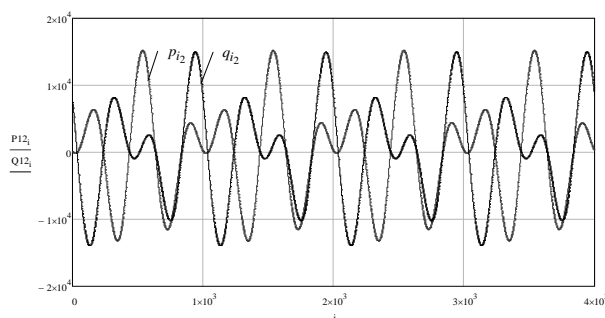


Рис. 3 – Залежності  $p_{i_2}$  та  $q_{i_2}$  за симетричних струмів фаз

За несиметричного навантаження (рис. 4) з'являються постійні складові потужностей, які характеризуються середніми значеннями:  $P_{i_2} = 3,7 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ,  $Q_{i_2} = -2,2 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ . Останні дозволяють виявити несиметрію навантажень за зворотною послідовністю основної гармоніки. Середньоквадратичні значення потужностей дещо збільшилися:  $P_{cki_2} = 8,2 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ,  $Q_{cki_2} = 8,2 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ .

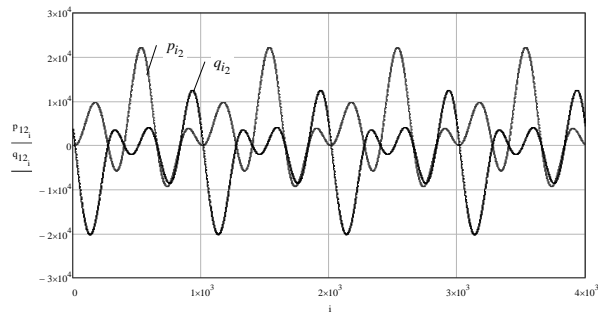


Рис. 4 – Залежності  $p_{i2}$  та  $q_{i2}$  за несиметричних струмів фаз

Розглянемо залежності миттєвих потужностей нульової послідовності  $p_{i0} = 3u_{i0}$ ,  $q_{i0} = 3u'_{i0}$  за симетричного навантаження (рис. 5). Середньоквадратичні значення цих потужностей:  $P_{cki0} = 1,4 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ,  $Q_{cki0} = 1,4 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ .

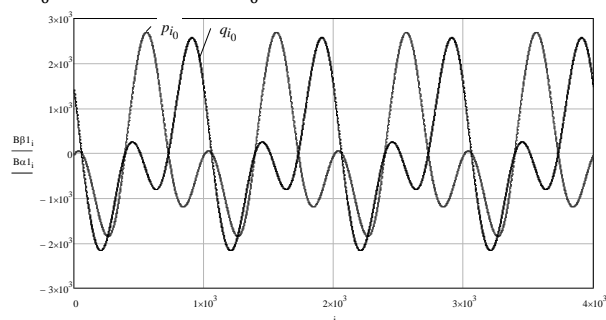


Рис. 5 – Залежності  $p_{i0}$  та  $q_{i0}$  за симетричних струмів фаз

За несиметричного навантаження (рис. 6) з'являються постійні складові потужностей, які характеризуються середніми значеннями:  $P_{i0} = 0 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ,  $Q_{i0} = -4,3 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ . Останні дозволяють виявити несиметрію навантажень за нульовою послідовністю.

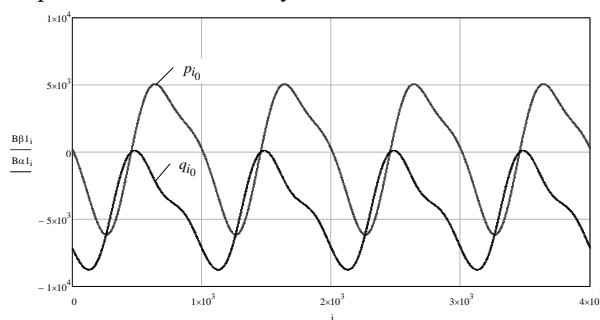


Рис. 6 – Залежності  $p_{i0}$  та  $q_{i0}$  за несиметричних струмів фаз

Середньоквадратичні значення значно збільшилися:  $P_{cki0} = 3,7 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ,  $Q_{cki0} = 2,9 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ . Змінився також характер коливань. Якщо раніше переважали коливання з чотирикратною частотою, то тепер – з подвійною частотою відносно промислової частоти мережі. Це пояснюється тим, що в несиметричному режимі в струмі нульової послідовності переважає основна гармоніка (див. рис. 2).

## Висновки.

1. Для виявлення нелінійних несиметричних споживачів доцільно використовувати струм  $i_2(t)$ , який характеризує несиметрію навантажень за основною гармонікою та несинусоїдність, що зумовлена наявністю гармонік, які утворюють зворотну послідовність.

2. Для оцінювання несиметричності споживачів доцільно використовувати середні значення умовних потужностей  $P_{i2}$ ,  $Q_{i2}$ ,  $P_{i0}$ ,  $Q_{i0}$ , які однозначно характеризують несиметрію струмів фаз за основною гармонікою.

3. Для оцінювання внеску споживачів в спотворення синусоїдної форми напруги доцільно використовувати середньоквадратичні значення умовних потужностей:  $P_{cki2}$ ,  $Q_{cki2}$ ,  $P_{cki0}$ ,  $Q_{cki0}$ .

## Список використаних джерел

1. Зыкин Ф. А. Энергетические процессы в системах электроснабжения с нагрузками, ухудшающими качество электроэнергии / Ф. А. Зыкин // *Электричество*, 1987. № 12, с. 5–9.
2. Зыкин Ф. А. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электроэнергии / Ф. А. Зыкин // *Электричество*, 1992. № 11, с. 13–19.
3. Крайчик Ю. С. Определение степени участия нагрузок в снижении качества электроэнергии / Ю. С. Крайчик, В. Н. Никифорова // *Электричество*, 1993. № 11, с. 72–74.
4. Сендерович, Г. А. Визначення часткової участі суб'єктів у порушенні якості електричної енергії / Г. А. Сендерович, автореферат дис. докт. техн. наук, Донецьк, 2012.
5. A novel approach based on nonactive power for the identification of disturbing loads in power systems / P. V. Barbaro, A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio // *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007. vol. 22, July. – pp. 1782–1789.
6. Stevanović D. A single-point method based in distortion power for the detection of harmonic sources in a power system / D. Stevanović, P. Petković // *Metrology and Measurement Systems*, Vol. XXI (2014), No. 1, pp. 3–14. Index 330930, ISSN 0860-8229
7. Stevanović D. A single-point method for identification sources of harmonic pollution applicable to standard power meters / D. Stevanović, P. Petković // *Electrical Engineering*, 2015, 97(2):165–174.
8. Смирнов С. С. Высшие гармоники в сетях высокого напряжения / С. С. Смирнов. - Новосибирск: Наука, 2010. – 327 с.
9. Автоматизовані системи обліку та якості електричної енергії / Гриб О. Г., Праховник А. В., Тесик Ю. Ф., Жаркін А. Ф., Новський В. О., Калінчик В. П., Красінський О. Л., Довгалюк О. М., Светелік О. Д.; під ред. Гриба О. Г. – Харків: ПП «Ранок-НТ», 2012. – 516 с.
10. Sokol E. I., Grib O. G., Shvets S. V. The structural and parametrical organization of elements of power supply system in the conditions of network centrism. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.2, pp 61–64. doi: 10/20998/2074-272X.2016.2.11
11. Важнов, А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А.И. Важнов. Л.: Энергия, 1980. – 256 с.
12. Generalized Symmetrical Components for Periodic Non-Sinusoidal Three-Phase Signals / P. Tenti, J. L. Willems, P. Mattavelli and E. Tedeschi // *Electrical Power Quality and Utilization, Journal*. – Vol XIII, No 1, 2007. – pp. 9–15
13. Бурбело М. Й. Визначення потужностей за несиметричних режимів трифазних мереж із заземленою нейтраллю / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук // *Технічна електродинаміка* – 2015. – № 4. – С. 71–75.
14. Бурбело М. Й. Визначення пульсуючої потужності в несиметричних несинусоїдних режимах електричних мереж / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, О. В. Степура // *Технічна електродинаміка*. – 2019. – № 1. – С. 42–49.
15. Бурбело М. Й. Оцінювання впливу нелінійних несиметричних навантажень на низьковольтні електричні мережі / М. Й. Бурбело, О. В. Степура // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2019. – № 1. – С. 24–30.

## References (transliterated)

1. Zykin F.A. Energeticheskiye protsessy v sistemakh elektroobrazovaniya s nagruzkami, ukhudshayushchimi kachestvom elektroenergii / F. A. Zykin // *Elektrichestvo*, 1987. № 12, s. 5-9.
2. Zykin F.A. Opredeleniye stepeni uchastiya nagruzk v snizheniye kachestva elektroenergii / F. A. Zykin // *Elektrichestvo*, 1992. № 11, s. 13-19.
3. Kraychik YU. S. Opredeleniye stepeni uchastiya nagruzk v snizheniye kachestva elektroenergii / YU.S. Kraychik, V. N. Nikiforova // *Elektrichestvo*, № 11, s. 72-74. 1993.
4. Senderovych, H. A. Vyznachennya chastkovoyi uchastyi sub'yektiv u porushenni yakosti elektrychnoyi enerhiyi / H. A. Senderovych, avtoreferat dys. dokt. tekhn. nauk, Donets'k, 2012.
5. A novel approach based on nonactive power for the identification of disturbing loads in power systems / P. V. Barbaro, A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio // *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007. vol. 22, July. – pp. 1782-1789.
6. Stevanović D. A single-point method based in distortion power for the detection of harmonic sources in a power system / D. Stevanović, P. Petković // *Metrology and Measurement Systems*, Vol. XXI (2014), No. 1, pp. 3–14. Index 330930, ISSN 0860-8229
7. Stevanović D. A single-point method for identification sources of harmonic pollution applicable to standard power meters / D. Stevanović, P. Petković // *Electrical Engineering*, 2015, 97(2):165-174.
8. Smirnov S. S. Vysshieye garmoniki v setyakh vysokogo napryazheniya / S. S. Smirnov. - Novosibirsk: Nauka, 2010. - 327 s.
9. Avtomatyzovani systemy obliku ta yakostielektrychnoienerhi i/ Hryb O. H., Prakhovnyk A. V., TesykYu. F., Zharkin A. F., Novskiy V. O., Kalintsyk V. P., Krasinskyi O. L., Dovhaliuk O. M., Svetelik O. D.; pid red. Hryba O. H. – Kharkiv: PP «Ranok-NT», 2012. – 516 s.
10. Sokol E. I., Grib O. G., Shvets S. V. The structural and parametrical organization of elements of power supply system in the conditions of network centrism. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.2, pp 61-64. doi: 10/20998/2074-272X.2016.2.11
11. Vazhnov, A. I. Perehodny`e protsessy` v mashinakh peremennogo toka / A. I. Vazhnov. – L.: E`nergiia, 1980. – 256 s.
12. Generalized Symmetrical Components for Periodic Non-Sinusoidal Three-Phase Signals / P. Tenti, J. L. Willems, P. Mattavelli and E. Tedeschi // *Electrical Power Quality and Utilization, Journal*. – Vol XIII, No 1, 2007. – pp. 9–15
13. Burbelo M. G. Vyznachennia potuzhnosti` za nesimetrichnikh rezhimiv trifaznikh merezh iz zazemlenoiu nei`tralliu / M. G. Burbelo, S. M. Mel`nichuk // *Tekhnichna elektrodinamika* – 2015. – № 4. – S. 71–75.
14. Burbelo M. G. Vyznachennia pul`suiuchoi potuzhnosti v nesimetrichnikh nesinusoidnikh rezhimakh elektrichnikh merezh / M. G. Burbelo, A. V. Gadai`, O. V. Stepura // *Tekhnichna elektrodinamika*. – 2019. – № 1. – S. 42-49.
15. Burbelo M. G. Otciniuvannia vplivu nelinei`nikh nesimetrichnikh navantazhen` na niz`kovol`tni elektrichni merezhi / M. G. Burbelo, O. V. Stepura // *VisnikVinnit`kogo politekhnichnogo institutu*. – 2019. – № 1. – S. 24-30.

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the authors

**Бурбело Михайло Йосипович<sup>1</sup>** (**Бурбело Михаил Иосифович, Burbelo Mikael**) – доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, 21021, Вінниця, Хмельницьке шосе, 95

**Степура Олександр Васильович<sup>2</sup>** (**Степура Александр Васильевич, Stepura Oleksandr Vasylovich**), ТОВ ІТЦ "Енергооблік", Вінниця, вул. Пирогова, 151А, офіс 23-29